Journal of Water and Soil
Homepage: https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 37, No. 6, Feb.-Mar., 2024, p. 891-906

Effects of Humic Acid as Fertigation on Phosphate and Iron Fertilizers Efficiency and Some of Mineral Nutrients Concentration in Corn (*Zea mays* L.)

M. Amarloo[1], M. Heshmati Rafsanjani[2*], M. Hamidpour[3]

1, 2 and 3- M.Sc. Student, Assistant Professor and Professor of Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: heshmati@vru.ac.ir)

Received:	06-08-2023	**How to cite this article:**
Revised:	11-10-2023	Amarloo, M., Heshmati Rafsanjani, M., & Hamidpour, M. (2024). Effects of humic acid as fertigation on phosphate and iron fertilizers efficiency and some of mineral nutrients concentration in corn (*Zea mays* L.). *Journal of Water and Soil, 37*(6), 891-906. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83587.1315
Accepted:	25-11-2023	
Available Online:	25-11-2023	

Introduction

Application of natural organic matter derived components, i.e. humic acid, as fertilizer is a suitable way to improve soil fertility and increase yield and quality of agricultural products. Many researchers reported positive effects of humic acid on water holding capacity, soil aeration, root formation and development, microorganism activities, and availability of mineral nutrients in soil. Antagonistic interaction between soil phosphorus and some micronutrients, especially in calcareous soils, can cause micronutrients deficiency in plants. With regard to positive effects of organic compounds on bioavailability of mineral nutrients, it seems that humic acid can positively affect the phosphorus interaction with micronutrients. Therefore, investigation of the effects of humic acid incorporated into irrigation water, phosphate and iron fertilizers application, on nutrients concentration in plants and their interactions is considerable.

Materials and Methods

This study was carried out to investigate the effects of application of humic acid in irrigation water, and phosphate and iron fertilizers in soil, on corn growth and concentration of P, Fe, Mn, Zn, and Cu in corn tissues. To this aim, a factorial experiment was conducted based on completely randomized design, with three replications in greenhouse. The factors included humic acid in 0, 70, and 140 mg kg^{-1} levels, (7 times as fertigation during growth season; total use equal to 0, 490, and 980 mg kg^{-1} of soil, respectively), phosphorus (P, as monocalcium phosphate monohydrate) in 0 and 50 mg kg^{-1} levels, and Fe (as ferrous sulfate heptahydrate) in 0, 10, and 20 mg kg^{-1} levels. P and Fe treatments were mixed with 4 kg of air-dried soil (<2 mm in diameter) and filled to the pots. Six seeds of maize (*Zea maye* L. cv. Single cross 704) were seeded per pot, and three seedlings were finally kept and grown for two months. After harvest, fresh and dried weight of shoots were measured. The roots were accurately extracted from the soil, washed, dried at 65°C, and weighed. Sample digestion and measuring concentration of P, Fe, Mn, Zn, and Cu were done according to conventional methods (P by a *UV-Visible Spectrophotometer* and metal elements by the *GBS Savant Atomic Absorption Spectrometer*). Statistical analyses were done by the *IBM SPSS Statistics version 26* software.

Results and Discussion

According to this study results, the main effect of humic acid, on P concentration and dry matter of shoots and roots, was statistically significant. In presence of P (2nd P level), 490 and 980 mg kg^{-1} humic acid levels significantly

https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83587.1315

increased the mean of dry matter compared to blank while humic acid had no significant effect on means of shoots and roots dry matter in 1st level of P (no P application). Increasing humic acid level from 490 to 980 mg kg^{-1}, significantly decreased mean of shoots dry matter. The interaction effect between humic acid and the other two factors exhibited statistical significance concerning root dry matter. The treatment combination of 50 mg kg^{-1} of P, 490 mg kg^{-1} of humic acid, and 20 mg kg^{-1} of Fe yielded the highest mean root dry matter, which was 97% greater than that of the control. The 2nd level of P significantly increased the means of shoots P concentration in all levels of humic acid and Fe factors, compared to those of the 1st P factor level. There was no significant difference between means of shoots P concentration in different levels of humic acid and Fe factors, at the 1st level of P factor, separately. On the other hand, at the 2nd level of P factor, significant differences were observed between the means of P concentration for both other factors (significant interaction between P and humic acid, and between P and Fe Factors). Applying humic acid could significantly increase the means of shoots P concentration at the 2nd level of P factor, but there was no significant difference between those of 490 and 980 mg kg^{-1} levels. About the effect of Fe factor on shoots P concentration, only 10 mg kg^{-1} level of Fe significantly increased it. The main effect of the P and humic acid factors and interaction of the P and Fe factor on roots P concentration, were statistically significant. Roots P concentration increased significantly by 490 and 980 mg kg^{-1} humic acid levels. A significant increase of roots P concentration was observed in the 1st P factor level and 10 mg kg^{-1} level of Fe compared to the blank, and in 50 mg kg^{-1} level of P, Fe factor had no significant effect on it. The results showed that humic acid could not improve P uptake by corn from the soil with low available phosphorus (*Olsen* extractable P lower than 4 mg kg^{-1}). The humic acid factor had no significant effect on Fe concentration of corn shoots, but its main effect and its triple interaction, with two other factors, on Fe concentration of the roots were statistically significant. There was no significant difference between the means of roots Fe concentration at the 1st level of P factor (9 treatments, various levels of humic acid and Fe factors). The highest mean of root's Fe concentration was found in treatment of the highest level of each factor, significantly more than those of the most of other treatments. About the Mn concentration in corn tissues, the Mn concentration in shoots was significantly increased by P fertilizer application, and Mn concentration in roots was significantly affected and increased by 490 and 980 mg kg^{-1} humic acid levels. The means of Mn concentration of roots in 490 and 980 mg kg^{-1} humic acid were not significantly different. The Zn concentration of corn shoots was significantly affected by interaction of the P and humic acid factors as the highest mean of it was in 0 mg kg^{-1} of P and 980 mg kg^{-1} humic acid levels, and there was no significant difference between those of other levels. The Zn concentration of corn roots was significantly increased by P applying and affected by the interaction of humic acid and Fe factors. When humic acid was at zero concentration level, Fe application of 20 mg kg^{-1} significantly decreased the Zn concentration of corn shoots while with humic acid application (490 and 980 mg kg^{-1}) no significant difference was observed between the means. This result showed that humic acid can decrease the antagonistic effects of Fe and Zn in soil. The Cu concentration in shoots was significantly affected by the P and Fe factors. Usage of P fertilizer significantly increased the Cu concentration of corn shoots; on the contrary, the 2nd and 3rd levels of Fe factor (Fe applications) significantly decreased Cu concentration in shoots of corn. Moreover, using humic acid could significantly increase Cu concentration of corn roots without any significant interaction with the other two factors.

Conclusion

The findings suggest that in soils with very low available P, humic acid alone does not enhance the growth and dry matter yield of corn. However, the efficiency of phosphate fertilizer can be enhanced by applying humic acid fertilizer through irrigation water. Additionally, humic acid has been observed to mitigate antagonistic effects between P and certain micronutrients, as well as reduce antagonistic interactions among metal micronutrients. For the positive effect of humc acid on growth and adequate chemical composition of corn, concentration of 490 mg kg^{-1} humic acid is recommended.

Keywords: Chemical composition, Dry matter, Fertilizer, Micronutrients, Organic acids

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۲، ص. ۹۰۶-۸۹۱

تأثیر اسید هیومیک همراه با آب آبیاری بر کارآیی کودهای شیمیایی فسفر و آهن و غلظت برخی عناصرغذایی معدنی گیاه ذرت

محمد امارلو [۱]- **محمد حشمتی رفسنجانی** [۲*]- **محسن حمیدپور** [۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۴

چکیده

به‌منظور بررسی تأثیر اسید هیومیک بر کارآیی کاربرد کودهای شیمیایی فسفر و آهن و غلظت برخی عناصرغذایی در گیاه ذرت (رقم سینگل کراس ۷۰۴)، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه اجرا شد. فاکتورهای آزمایش شامل اسید هیومیک همراه با آب آبیاری در سه سطح (صفر، ۷۰ و ۱۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، هفت نوبت با آب آبیاری؛ معادل صفر، ۴۹۰ و ۹۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم طی فصل رشد)، فسفر به شکل مونوکلسیم فسفات در دو سطح (صفر و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) و آهن به شکل سولفات آهن در سه سطح (صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) بودند. نتایج نشان داد که اسید هیومیک در اندام هوایی به‌طور مسقل تنها بر ماده خشک و در برهم‌کنش با فسفر غلظت فسفر و روی را تحت تأثیر قرار داده است؛ اما در ریشه، اسید هیومیک توانست موجب افزایش معنی‌دار وزن خشک ریشه و غلظت عناصر فسفر، آهن، منگنز و مس گردد. برهم‌کنش سه‌گانه‌ی اسید هیومیک با دو فاکتور دیگر تنها بر ماده خشک ریشه و غلظت آهن ریشه معنی‌دار بود. بیش‌ترین تأثیر بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه به‌ترتیب مربوط به فسفر و اسید هیومیک بود و در ریشه آهن نیز در جایگاه سوم قرار گرفت. باتوجه به فقر اولیه خاک از نظر فسفر، اسید هیومیک نتوانست فراهمی آن را افزایش دهد ولی در افزایش بازده فسفر کاربردی مؤثر بود. اسید هیومیک در افزایش غلظت هر چهار عنصر ریزمغذی آهن، منگنز، روی و مس در هر دو بخش اندام هوایی و ریشه یا یکی از آن‌ها، به‌طور مستقل یا در برهم‌کنش با آهن یا فسفر، مؤثر بود. کاربرد اسید هیومیک همراه با آب آبیاری، در هر دو سطح، توانست مانع کاهش غلظت روی در ریشه در حضور ۲۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک شود که در مجموع افزایش جذب روی را نشان می‌داد. کاربرد آهن باعث افزایش غلظت فسفر در اندام هوایی و کاهش آن در ریشه شد. آهن هم‌چنین موجب کاهش غلظت روی ریشه و مس اندام هوایی شد درحالی‌که بر خلاف انتظار بر غلظت منگنز بافت گیاه، تأثیر معنی‌داری نداشت.

واژه‌های کلیدی: اسیدهای آلی، ترکیب شیمیایی، عناصر ریزمغذی، کودهای شیمیایی، وزن خشک

مقدمه

تغذیه پایدار جهان یکی از چالش‌های بزرگ جامعه ما است (FAO, 2015). افزایش تصاعدی جمعیت، بین سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۰، تقاضا برای غذا را به شدت افزایش داد؛ این تقاضا با ترکیبی از پیشرفت‌های علمی و فناوری، سیاست دولت‌ها، مداخله نهادی و سرمایه‌گذاری تجاری و نوآوری و تحویل، برآورده شد. تخمین زده می‌شود در سال ۲۰۵۰ جمعیت جهان به حدود ۱۰ میلیارد نفر برسد و نیاز به مواد غذایی ۷۰ درصد بیش‌تر از دهه دوم قرن، خواهد بود (Keating *et al.*, 2010; Keating *et al.*, 2014). در راستای مبارزه با گرسنگی، در برنامه‌ی توسعه پایدار سازمان ملل، پایان دادن به گرسنگی و بهبود امنیت غذایی، به‌عنوان اهداف اولیه تعیین و در دستور کار قرار گرفته

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استادیار و استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: heshmati@vru.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83587.1315

است. تولید ذرت برای بقای انسان، به‌عنوان یکی از سه محصول غذایی جهانی، حیاتی است (Li *et al.*, 2022). ذرت، پس از گندم و برنج، به عنوان سومین فرآورده مهم کشاورزی در جهان، اهمیت دارد. این فرآورده کشاورزی ارزشمند، علاوه بر آنکه حدود ۷۰ درصد از خوراک طیور را فراهم می‌آورد، دانه‌ای سودمند برای تولید روغن خوراکی، نشاسته و گلوکز و چندین فرآورده دیگر است (Hosseini & Abedi, 2007). گیاهان برای اینکه به‌طور طبیعی رشد نموده و به زندگی خود ادامه دهند به عناصر غذایی کافی و متعادل نیاز دارند. به‌منظور تأمین نیاز غذایی محصولات کشاورزی و افزایش تولید در واحد سطح، عملیات متعددی نظیر مصرف کودهای شیمیایی صورت می‌گیرد (Chaji *et al.*, 2013). مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی موجب آسیب‌های زیادی به محیط زیست و بهداشت مواد خوراکی شده و مواد مضر سرطان‌زا را افزایش می‌دهند (Subhash *et al.*, 2001). استفاده از کودها و مشتقات آلی طبیعی، ازجمله اسید هیومیک، بدون اثرات مخرب زیست‌محیطی جهت بالا بردن عملکرد و میزان زیست‌توده گیاهان، به‌خصوص در شرایط متغیر محیطی، راهکار مناسبی‌ست و از اسید هیومیک به‌عنوان کود آلی سازگار با طبیعت نام برده می‌شود (Arjumend *et al.*, 2015). اسید هیومیک علاوه بر تأثیر مثبتی که بر جنبه‌های مختلف فتوسنتز دارد با افزایش تولید قند، پروتئین و ویتامین در گیاه، محتوای غذایی محصولات کشاورزی را بهبود می‌بخشد (Cavani *et al.*, 2023). قربانی و همکاران (Ghorbani *et al.*, 2010) در بررسی اثر کاربرد اسید هیومیک در آب آبیاری، بر عملکرد و اجزاء عملکرد ذرت به این نتیجه رسیدند که استفاده از اسید هیومیک می‌تواند اثرات مثبتی را بر عملکرد دانه ذرت و برخی از صفات زراعی مرتبط با عملکرد دانه داشته باشد، که این اثرات می‌تواند در نتیجه‌ی بهبود شرایط فیزیولوژیکی گیاه باشد. اسید هیومیک به عنوان یک کود آلی باعث بهبود ساختار خاک، افزایش ریشه‌زایی، نگهداری بیش‌تر آب در خاک، کمک به رشد سریع باکتری‌های مفید در خاک، کمک به انحلال و آزادسازی عناصر غذایی و کاهش نیاز به کودهای شیمیایی می‌گردد (Oktem & Oktem, 2020). همچنین مواد هیومیکی می‌توانند فسفات‌های نامحلول را به فسفر قابل‌دسترس در خاک تبدیل کنند و درنتیجه نقش حمایتی در تأمین فسفر برای رشد گیاه دارند (Yuan *et al*,. 2022).

فسفر دومین عنصر پرمغذی مهم محدود کننده‌ی رشد گیاه و کم تحرک‌ترین عنصر ریزوسفر گیاهی است که برای رشد و توسعه محصول ضروری است (Holford, 1997). برخلاف فراوان بودن فسفر در بسیاری از خاک‌ها، مقادیر قابل جذب این عنصر برای گیاهان اندک و اغلب کم‌تر از نیاز گیاهان است زیرا عمده‌ی فسفر خاک به شکل فسفات‌های آهن و آلومینیم یا کلسیم، در شرایط اسیدی و قلیایی، بوده و حلالیت ناچیزی دارند (Li *et al.*, 2016)؛ بخش زیادی از فسفات موجود در کودهای فسفر نیز پس از ورود به خاک، در ترکیب با کاتیون‌های آهن، آلومینیم و کلسیم، بسته به واکنش خاک و حضور این کاتیون‌ها، به‌صورت رسوب از محلول خاک خارج می‌شوند. رسوب و جذب سطحی نیز در کاهش فراهمی فسفر خاک نقش دارند که در حضور ترکیبات آلی محلول خاک، انرژی جذب کم‌تر و فراهمی ثانویه افزایش می‌یابد. به‌طور کلی، تنها بخش کوچکی از فسفر کودهای فسفاتی در حمایت از رشد گیاه مؤثر هستند و بخش فراوانی از آن از دسترس گیاه خارج می‌شود (Yuan *et al.*, 2022). اگر چه پژوهش‌های بسیاری نشان داده‌اند که اسید هیومیک به همراه مونوکلسیم فسفات می‌تواند حرکت و در دسترس بودن فسفر را در خاک افزایش دهد و همچنین اسید هیومیک در مقادیر زیاد، می‌تواند با آزادسازی پروتون در ریزوسفر کارایی کودهای فسفر را افزایش دهد (Jing *et al.*, 2020)، ولی به نظر می‌رسد با تشکیل کمپلکس‌های فسفات با بنیان‌های آلی و از طرفی تشکیل کمپلکس‌های آلی پایدار آهن، با کاربرد اسید هیومیک برهم‌کنش تنازعی این دو عنصر غذایی نیز کاهش و بازده‌ی کودی و فراهمی دو عنصر، افزایش یابد. آهن یکی از عناصر ریزمغذی و ضروری رشد گیاه است که به شکل کاتیون Fe^{2+} جذب می‌شود. این عنصر یکی از عناصر ضروری برای ساخت کلروفیل، فتوسنتز، تنفس و سیستم‌های آنزیمی در گیاه است. میانگین غلظت عنصر آهن در پوسته‌ی جامد زمین و خاک به‌ترتیب ۵/۱ و ۳/۸ درصد وزنی است (Lindsay, 1979). برخی از خصوصیات خاک از جمله قلیایی بودن خاک و مصرف بیش از حد کودهای فسفردار تغذیه آهن برای گیاه را تحت تأثیر قرار داده و باعث کاهش فراهمی این عنصر می‌شود (Ronaghi *et al.*, 2002). یکی از راه‌های افزایش قابلیت دسترسی آهن، افزودن مواد آلی یا مشتقات آن‌ها به خاک است. اسیدهای آلی با مکانیسم‌های شیمیایی مانند کاهش pH ریزوسفری و ایجاد کمپلکس‌های فلزی، فراهمی آهن و به‌طور کلی عناصر ریزمغذی را افزایش می‌دهند. مطالعات زیادی، نقش مثبت اسیدهای آلی در افزایش جذب و دسترس‌پذیری آهن و عناصر ریزمغذی را گزارش کرده اند (Gerke, 2021). برهم‌کنش منفی میان فسفر و برخی عناصر غذایی ضروری گیاه در مطالعات زیادی گزارش شده است. مصرف بی رویه کودهای فسفاتی موجب کاهش در جذب، قابلیت دسترسی و انتقال عناصر ریزمغذی، از جمله آهن می‌شود (Ronaghi *et al.*, 2002).

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، تأثیر کاربرد اسید هیومیک با آب آبیاری، کود فسفاتی و کود آهن و برهم‌کنش آن‌ها بر غلظت فسفر، آهن، منگنز، روی و مس در گیاه ذرت مورد بررسی قرار گرفت. پژوهش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه انجام شد؛ فاکتورهای آزمایش شامل اسید هیومیک در آب آبیاری، در سه سطح (صفر، ۷۰ و ۱۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، هفت نوبت با آب آبیاری؛ معادل

صفر، ۴۹۰ و ۹۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم طی فصل رشد)، فسفر به صورت مونوکلسیم فسفات، در دو سطح صفر و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک (Masood *et al.*, 2021) و آهن به صورت سولفات آهن، در سه سطح (صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) بودند. تیمارهای فسفر و آهن به چهار کیلوگرم خاک زیر الک دو میلی‌متر (برخی ویژگی‌های خاک در جدول ۱ آمده است)، افزوده و به‌خوبی مخلوط و به گلدان‌ها منتقل شد. گلدان‌ها تا ظرفیت زراعی آبیاری و تعداد شش بذر ذرت، رقم سینگل کراس ۷۰۴، ابتدا با قارچ کش و ویتاواکس ضدعفونی و پس از جوانه‌زنی در عمق سه سانتی‌متری خاک هر گلدان کشت و با ماسه‌ی شسته پوشانده شد. پس از سبز شدن و استقرار کامل گیاه، تعداد سه گیاهچه در هر گلدان حفظ و مابقی حذف شدند. پس از تنک کردن بوته‌ها آبیاری به‌صورت یک نوبت آب مقطر و یک نوبت تیمارهای اسید هیومیک، در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، انجام شد؛ در هر نوبت آبیاری با آب مقطر، رطوبت گلدان‌ها به ظرفیت زراعی رسانده شد که با توزین چند گلدان انجام می‌شد. در طول دوره‌ی رشد نه هفته‌ای، هفت بار تیمارهای اسید هیومیک اعمال گردیدند. با توجه به نتایج تجزیه خاک و نیاز غذایی گیاه، پتاسیم در یک نوبت و نیتروژن مورد نیاز در سه نوبت به صورت محلول به خاک افزوده شد. سایر عناصر غذایی ریزمغذی، غیر از آهن، نیز در ترکیب مشابه محلول هوگلند در چهار نوبت، به صورت آب آبیاری، به خاک گلدان‌ها افزوده شدند. در پایان دوره‌ی رشد حدود دو ماهه، برخی پارامترهای رویشی اندازه‌گیری و برداشت بوته‌ها از ۱/۵ سانتی‌متری سطح خاک انجام و نمونه‌ها به روش متداول شسته و در ۶۵ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت خشک و توزین شدند. چند روز پس از برداشت، استخراج ریشه‌ها از خاک انجام و پس از شستشو و خشک کردن در آون، توزین انجام شد. هضم به روش خشک‌سوزانی و عصاره‌گیری با اسید کلریدریک دو نرمال انجام شد. غلظت فسفر به روش طیف‌سنجی با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر و غلظت آهن، منگنز، روی و مس با استفاده از دستگاه جذب اتمی، مدل GBC Savant AA، اندازه‌گیری شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS Statistic 26 و مقایسه‌ی میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن، در سطح احتمال پنج درصد، انجام شد.

نتایج

نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر وزن خشک و غلظت عناصر غذایی اندام هوایی (برگ و ساقه) و ریشه گیاه ذرت در جداول ۲ و ۳، آمده است. وزن خشک اندام هوایی تحت تأثیر معنی‌دار هر سه فاکتور و نیز برهم‌کنش فسفر-اسید هیومیک و فسفر-آهن قرار گرفت اما ماده خشک تولیدی ریشه فقط تحت تأثیر معنی‌دار فاکتورهای فسفر و اسید هیومیک، برهم‌کنش فسفر-اسید هیومیک و برهم‌کنش هر سه عامل قرار گرفت؛ یعنی اگرچه آهن به‌طور مستقل یا در برهم‌کنش دوگانه با دو فاکتور دیگر بر وزن خشک ریشه اثر معنی‌داری نداشت ولی در برهم‌کنش سه‌گانه با دو فاکتور دیگر، اثرات معنی‌داری بر وزن خشک ریشه داشت. براساس نتایج، در اندام هوایی فاکتورهای فسفر و آهن بر غلظت فسفر، آهن و مس اثر معنی‌دار داشته‌اند در حالی‌که اسید هیومیک بر غلظت هیچ‌کدام از پنج عنصر مورد بررسی در اندام هوایی، تأثیر معنی‌دار نداشت (جدول ۲).

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از اعمال تیمارها و کاشت

Table 1- Some of physical and chemical parameters in soil before treatment and planting

ویژگی Parameter	مقدار Value	ویژگی Parameter	مقدار Value
رطوبت وزنی ظرفیت زراعی % $\theta_{m, FC}$	21	فسفر قابل استفاده Available P (mg kg^{-1})	3.8
شن Sand (%)	70	پتاسیم قابل استفاده Available K (mg kg^{-1})	279
سیلت Silt (%)	13	آهن قابل استفاده،* Available Fe* (mg kg^{-1})	0.81
رس Clay (%)	17	روی قابل استفاده* Available Zn* (mg kg^{-1})	0.45
بافت خاک Soil texture	Sandy loam	منگنز قابل استفاده* Available Mn* (mg kg^{-1})	1.37
قابلیت هدایت الکتریکی EC (dS m^{-1})	3.54	مس قابل استفاده* Available Cu* (mg kg^{-1})	0.27
pH	7.9		

*: عصاره‌گیری شده با DTPA

*: Extracted by DTPA

برهم‌کنش سه‌گانه‌ی فاکتورها بر غلظت عناصر غذایی در اندام هوایی، معنی‌دار نبود ولی برهم‌کنش فسفر-اسید هیومیک برغلظت فسفر و روی و برهم‌کنش فسفر-آهن تنها بر غلظت فسفر معنی‌دار شدند (جدول ۲). در ریشه‌ی گیاه ذرت، اثر فاکتورها و برهم‌کنش بین آن‌ها بر غلظت عناصر غذایی مورد بررسی، متفاوت از اندام هوایی بود که در جدول ۳، قابل مشاهده هستند.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس وزن خشک اندام هوایی (گرم بر گلدان)، غلظت عناصر فسفر (درصد) و آهن، منگنز، روی و مس (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در اندام هوایی ذرت

Table 2- Results of analysis of variance of shoots dry matter (g pot^{-1}), P concentration (%), and Fe, Mn, Zn, and Cu concentrations (mg kg^{-1}) in corn shoot

منبع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares					
		وزن خشک اندام هوایی Shoot dry matter	فسفر P	آهن Fe	منگنز Mn	روی Zn	مس Cu
P	1	569.65**	0.074**	2343.90**	12043.6**	12.78^{ns}	105.57**
HA	2	41.64**	0.001^{ns}	51.83^{ns}	612.6^{ns}	8.64^{ns}	9.30^{ns}
Fe	2	9.88*	0.001*	3273.14**	112.4^{ns}	1.79^{ns}	19.39**
P*HA	2	25.01**	0.002**	727.21^{ns}	3.2^{ns}	17.79**	9.95^{ns}
P*Fe	2	8.35*	0.001*	490.92^{ns}	448.1^{ns}	2.59^{ns}	2.66^{ns}
HA*Fe	4	1.87^{ns}	0.0003^{ns}	353.32^{ns}	385.9^{ns}	1.40^{ns}	3.99^{ns}
P*HA*Fe	4	1.26^{ns}	0.001^{ns}	94.74^{ns}	346.2^{ns}	1.33^{ns}	6.44^{ns}
Error خطا	34	1.91	0.0004	244.63	199.8	3.26	3.22
ضریب تغییرات CV (%)		30.2	26.3	17.5	22.9	5.9	12.3

P: فسفر؛ HA: اسید هیومیک؛ Fe: آهن؛ **: معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪؛ *: معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪؛ ns: غیر معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد.

P: Phosphorus; HA: Humic Acid; Fe: Iron; *Significant at the 5% level; ** Significant at the 1% level; ns: not Significant at P=0.05.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس وزن خشک ریشه (گرم بر گلدان)، غلظت عناصر فسفر (درصد) و آهن، منگنز، روی و مس (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در ریشه‌ی ذرت

Table 3- Results of analysis of variance of shoots dry matter (g pot^{-1}), P concentration (%), and Fe, Mn, Zn, and Cu concentrations (mg kg^{-1}) of corn root

منبع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares					
		وزن خشک ریشه Root dry matter	فسفر P	آهن Fe	منگنز Mn	روی Zn	مس Cu
P	1	32.59**	0.0290**	217811.01**	3157.5^{ns}	19.69*	101.30*
HA	2	2.94**	0.0010*	56372.47**	7239.1*	5.58^{ns}	79.38*
Fe	2	0.59^{ns}	0.0001^{ns}	31865.20*	2234.2 ^{ns}	3.03^{ns}	46.96^{ns}
P*HA	2	2.81**	0.0001^{ns}	7761.11^{ns}	3603.7 ^{ns}	2.32^{ns}	10.96^{ns}
P*Fe	2	0.324^{ns}	0.0010*	35480.75**	2756.7 ^{ns}	1.10^{ns}	23.54^{ns}
HA*Fe	4	0.183^{ns}	0.0001^{ns}	13781.22^{ns}	1512.6 ^{ns}	15.78**	28.97ns
P*HA*Fe	4	0.75*	0.0003^{ns}	17527.49*	1948.6 ^{ns}	4.62ns	31.64^{ns}
خطا Error	34	0.27	0.0002	6502.46	1455.2	3.64	23.21
ضریب تغییرات CV (%)		24.4	30.1	۰25.3	31.2	4.8	22.1

P: فسفر؛ HA: اسید هیومیک؛ Fe: آهن؛ **: معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪؛ *: معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪؛ ns: غیر معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد.

P: Phosphorus; HA: Humic Acid; Fe: Iron; *Significant at the 5% level; ** Significant at the 1% level; ns: not Significant at P=0.05.

وزن خشک

نتایج تجزیه‌ی واریانس اثر معنی‌دار هر سه فاکتور بر وزن خشک اندام هوایی را نشان داد (جدول ۲)؛ اما فقط برهم‌کنش دوگانه‌ی فسفر–اسید هیومیک و فسفر–آهن بر این ویژگی، به‌ترتیب در سطح یک و پنج درصد، معنی‌دار بود. مقایسه‌ی میانگین‌های وزن خشک اندام هوایی برای این برهم‌کنش‌ها در جداول ۴ و ۵ آمده است. وزن خشک اندام هوایی بدون مصرف فسفر به‌طور معنی‌داری کمتر از تیمارهای با کاربرد فسفر در تمامی سطوح کاربرد اسید هیومیک بود که به دلیل فقر اولیه فسفر خاک (جدول ۱) بوده است. سطوح مختلف اسید هیومیک بدون کاربرد فسفر نتوانست اختلاف معنی‌داری در میانگین‌های ماده خشک هوایی ایجاد کند درصورتی‌که با بر طرف شدن نیاز فسفر (سطح دوم فسفر)، کاربرد اسید هیومیک در آب آبیاری به‌طور معنی‌داری ماده خشک اندام هوایی را افزایش داد و بیش‌ترین افزایش در سطح ۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم (۱۰۳ درصد افزایش نسبت به شاهد) مشاهده شد و وزن خشک اندام هوایی در سطح ۱۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌طور معنی‌داری نسبت به آن کاهش نشان داد (جدول ۴). کاهش ماده تولیدی (خشک و تر) با افزایش مقدار کاربردی اسید هیومیک یا سایر اسیدهای آلی در پژوهش‌های متعددی گزارش شده است که می‌تواند به دلیل کاهش پتانسیل اسمزی و اثر شوری باشد؛ اما نتایج پژوهش آیلاج و همکاران (Aylaj *et al.*, 2023) نشان داد که تأثیر غلظت‌های بالای اسید هیومیک بر ماده‌ی خشک تولیدی بستگی به منبع مواد آلی کمپوست شده برای تهیه‌ی اسید هیومیک دارد و این تأثیر در افزایش غلظت اسید هیومیک استخراج شده از منابع مختلف، از صفر به ۰/۱ و یک گرم بر لیتر (تزریق ۱۰ میلی‌لیتر نزدیک ریشه، معادل ۲/۸ متر مکعب بر هکتار)، در گیاه مناداب، متفاوت بود به‌طوری‌که در مواردی، موجب افزایش یا برعکس کاهش وزن خشک ریشه شده‌بود.

همانند اسید هیومیک، سطوح مختلف آهن نیز بدون مصرف فسفر، اثر معنی‌داری بر وزن خشک اندام هوایی نداشتند اما در سطح ۲ (کاربرد فسفر، سطوح ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم، وزن خشک را به‌طور معنی‌داری افزایش دادند (جدول ۵). افزایش وزن خشک هوایی در سطح ۳ آهن نسبت به سطح ۲، معنی‌دار نبود. بیش‌ترین مقدار وزن خشک اندام هوایی در سطح ۲ فسفر و سطح ۳ آهن مشاهده گردید که نسبت به شاهد ۷۸ درصد افزایش داشت.

وزن خشک ریشه تحت تأثیر معنی‌دار فاکتور آهن و برهم‌کنش دوگانه‌ی آن با دو فاکتور دیگر، قرار نگرفت ولی بر هم‌کنش سه گانه ی فسفر–اسید هیومیک–آهن معنی‌دار شد که مقایسه میانگین‌ها در جدول ۶ آمده‌است. در سطح ۱ فسفر هیچ اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای نه‌گانه‌ی با سطح متفاوت آهن و اسید هیومیک وجود نداشت.

جدول ٤- مقایسه‌ی میانگین وزن خشک اندام هوایی ذرت (گرم بر گلدان) در سطوح مختلف فسفر و اسید هیومیک

Table 4- Mean comparison of corn shoot dry matter (g pot^{-1}) in different levels of phosphorus and humic acid

فسفر Phosphorus (mg kg^{-1} of soil)	اسید هیومیک Humic Acid (mg kg^{-1}, 7 times as fertigation) 0	70	140	میانگین Mean
0	9.38^{d}	10.05^{d}	9.46^{d}	9.65^{B}
50	13.85^{c}	19.02^{a}	15.80^{b}	16.32^{A}
میانگین Mean	11.62^{C}	14.28^{A}	12.82^{A}	

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هم‌فونت و هم‌قلم هستند، تفاوت معنی‌داری، با آزمون دانکن در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

Means followed by the same letters with the same style, are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level.

جدول ٥- مقایسه‌ی میانگین وزن خشک اندام هوایی ذرت (گرم بر گلدان) در سطوح مختلف فسفر و آهن

Table 5- Mean comparison of corn shoot dry matter (g pot^{-1}) in different levels of phosphorus and Fe (iron)

فسفر Phosphorus (mg kg^{-1} of soil)	آهن Fe (mg kg^{-1} of soil) 0	10	20	میانگین Mean
0	9.61^{c}	9.55^{c}	9.75^{c}	9.65^{B}
50	14.76^{b}	16.60^{ab}	17.11^{a}	16.32^{A}
میانگین Mean	12.18^{B}	13.28^{A}	13.21^{A}	

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هم فونت و هم قلم هستند، تفاوت معنی‌داری، با آزمون دانکن در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

Means followed by the same letters in the same style, are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level.

جدول ٦- مقایسه‌ی میانگین‌های وزن خشک ریشه (گرم بر گلدان) در سطوح مختلف فسفر، اسید هیومیک، آهن

Table 6- Mean comparison of corn root dry matter (g pot^{-1}) in different levels of phosphorus, humic acid, and Fe (iron)

فسفر Phosphorus (mg kg^{-1} of soil)	اسید هیومیک Humic Acid (mg kg^{-1}, 7 times as fertigation)	آهن Fe (mg kg^{-1} of soil) 0	10	20	میانگین Mean
	0	3.28^{h}	3.58^{fgh}	3.72^{fgh}	3.53^{C}
0	70	3.48^{gh}	3.56^{fgh}	3.48^{gh}	3.51^{C}
	140	3.28^{h}	4.10^{e-h}	3.58^{fgh}	3.60^{C}
	0	4.33^{d-g}	4.55^{c-f}	3.94^{e-h}	4.27^{B}
50	70	5.32^{bc}	5.79^{ab}	6.47^{a}	5.78^{A}
	140	5.28^{bcd}	4.81^{cde}	5.96^{ab}	5.35^{A}
میانگین* Mean*		4.16	4.41	4.42	

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هم‌فونت و هم‌قلم هستند، تفاوت معنی‌داری، با آزمون دانکن در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

*: مقایسه‌ی میانگین، به دلیل معنی‌دار نبودن اثر اصلی عامل براساس نتایج تجزیه‌ی واریانس، انجام نشد.

Means followed by the same letters in the same style, are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level.
*: Mean comparison was not done since the main effect of the factor was not significant according to the ANOVA results.

در حالی‌که با کاربرد فسفر (سطح ۲)، اختلافات معنی‌دار بین میانگین‌ها مشاهده شد به‌طوری‌که در سطح ۲ آهن، با مصرف اسید هیومیک، وزن خشک ریشه افزایش معنی‌دار نشان داد و بیش‌ترین وزن خشک ریشه نیز با کاربرد فسفر در سطح ۲ اسید هیومیک و سطح ۳ آهن بود که حدود دو برابر شاهد بود؛ از طرفی با کاربرد فسفر و بدون مصرف هیومیک اسید، اختلاف معنی‌داری بین میانگین‌های سه سطح آهن وجود نداشت. افزایش وزن ماده خشک تولیدی با کاربرد مواد هیومیکی می‌تواند به‌دلیل تولید محرک‌های رشد شبه اکسین باشد که موجب افزایش فعالیت‌های بیوشیمیایی گیاه می‌شوند (Jindo *et al.*, 2012). کاربرد آهن نیز در سطح ۱ و سطح ۳ اسید هیومیک همراه با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک، موجب افزایش معنی‌دار وزن خشک ریشه شد درحالی‌که در سطح ۲ اسید هیومیک، سطح ۲ آهن افزایش معنی‌دار و سطح ۳ آهن کاهش معنی‌دار وزن خشک ریشه را در پی داشتند (جدول ۶).

غلظت فسفر

با توجه به نتایج تجزیه واریانس، مقایسه‌ی میانگین‌های غلظت فسفر اندام هوایی در برهم‌کنش‌های فسفر-آهن و فسفر-اسید هیومیک، انجام شد. افزایش معنی‌دار غلظت فسفر اندام هوایی با مصرف خاکی این عنصر در تمامی سطوح آهن و اسید هیومیک مشاهده شد. در سطح ۱ فسفر (عدم مصرف)، هیچ اختلاف معنی‌داری بین غلظت‌های فسفر در سطوح مختلف اسید هیومیک و همچنین در سطوح مختلف آهن مشاهده نگردید اما در سطح ۲ (۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک)، اثرات معنی‌دار سطوح آهن و اسید هیومیک دیده شد (جداول ۷ و ۸). غلظت فسفر اندام هوایی با کاربرد فسفر، در سطوح مختلف اسید هیومیک افزایش معنی‌دار نشان داد ولی اختلاف معنی‌داری بین سطح ۲ و سطح ۳ آن وجود نداشت (جدول ۷). مقایسه‌ی میانگین‌ها نشان داد که آهن نیز همانند اسید هیومیک نتوانسته است غلظت فسفر اندام هوایی را بدون کاربرد فسفر تحت تأثیر قرار دهد ولی با کاربرد فسفر، کاربرد ۱۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک، موجب افزایش معنی‌داری غلظت فسفر در اندام هوایی شد ولی اختلاف میانگین غلظت فسفر اندام هوایی در سطح ۳ آن با سطح ۱، معنی‌دار نبود (جدول ۸)؛ از طرفی با افزایش سطح کاربرد آهن از ۱۰ به ۲۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک (سطح ۳)، غلظت فسفر اندام هوایی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. نتایج نشان می‌دهد کاربرد اسید هیومیک، در افزایش فراهمی فسفر اولیه خاک، تأثیر مثبتی نداشته است در حالی‌که در افزایش راندمان جذب فسفر اضافه شده به خاک اثر مثبت معنی‌دار داشته‌است. مواد هیومیکی در تعامل با فسفر ممکن است تثبیت فسفر یا انرژی جذب سطحی آن را کاهش داده و موجب افزایش فراهمی فسفر برای گیاه شوند (Hua *et al.*, 2008). کاربرد اسید هیومیک در خاک می‌تواند با افزایش فعالیت فسفات در محلول خاک، کارایی کود فسفر را در خاک‌های آهکی افزایش دهد (Fixen *et al.*, 1983). نقش اسید هیومیک در افزایش دسترسی فسفر و همچنین به عنوان محرک رشد گیاه، در مطالعات زیادی گزارش شده‌است (Ertani *et al.*, 2013; Jindo *et al.*, 2012).

غلظت فسفر ریشه، تحت تأثیر معنی‌دار فاکتور فسفر، اسید هیومیک و برهم‌کنش دوگانه‌ی فسفر-آهن قرار گرفت (جدول ۲). با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک، غلظت فسفر ریشه از ۰/۰۷۲ درصد به ۰/۱۲ درصد رسید که حدود ۶۷ درصد افزایش معنی‌دار نشان داد. اسید هیومیک بر غلظت فسفر ریشه تأثیر معنی‌دار داشت و کاربرد سطح ۳ اسید هیومیک، موجب افزایش معنی‌دار غلظت فسفر ریشه ذرت نسبت به سطح ۱ آن (عدم کاربرد) شد، اما میانگین غلظت فسفر ریشه در سطح ۲ و سطح ۳ اسید هیومیک، اختلاف معنی‌داری نداشتند (شکل ۱).

جدول ۷- مقایسه‌ی میانگین‌های غلظت فسفر اندام هوایی ذرت (درصد) تحت تأثیر برهم‌کنش فسفر و اسید هیومیک

Table 7- Mean comparison of P concentration (%) in shoots of corn as affected by the interaction of phosphorus and humic acid levels

فسفر Phosphorus (mg kg^{-1} of soil)	اسید هیومیک Humic Acid (mg kg^{-1}, 7 times as fertigation)			میانگین Mean
	0	70	140	
0	0.134^{c}	0.138^{c}	0.126^{c}	0.132^{B}
50	0.191^{b}	0.212^{ab}	0.225^{a}	0.208^{A}
میانگین* Mean*	0.163	0.173	0.178	

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هم‌فونت و هم‌قلم هستند، تفاوت معنی‌داری، با آزمون دانکن در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

*: مقایسه‌ی میانگین، به دلیل معنی‌دار نبودن اثر اصلی عامل براساس نتایج تجزیه‌ی واریانس، انجام نشد.

Means followed by the same letters with the same style, are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level.
*: Mean comparison was not done since the main effect of the factor was not significant according to the ANOVA results.

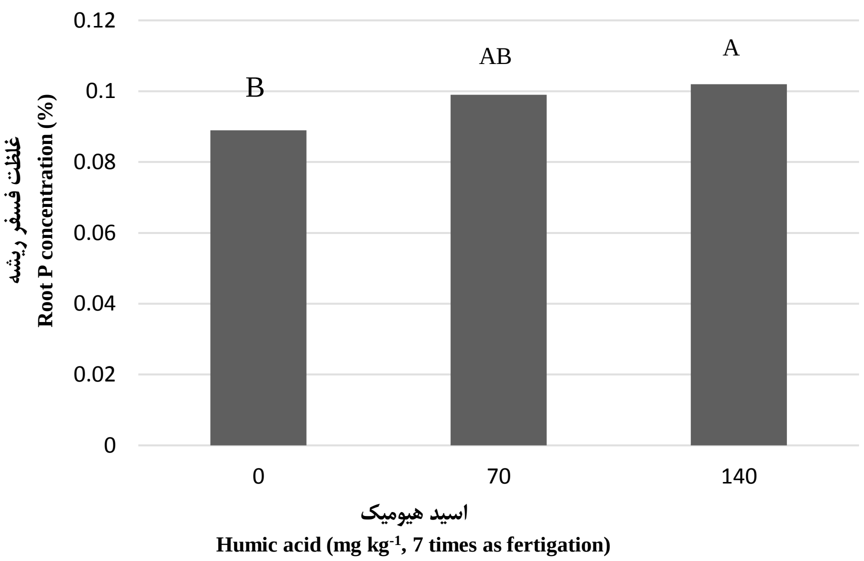
جدول ۸- مقایسه‌ی میانگین‌های غلظت فسفر اندام هوایی ذرت (درصد) تحت تأثیر برهم‌کنش فسفر و آهن

Table 8- Mean comparison of P concentration (%) in shoots of corn as affected by the interaction of phosphorus and Fe levels

فسفر Phosphorus (mg kg^{-1} of soil)	آهن Fe (mg kg^{-1} of soil)			میانگین Mean
	0	10	20	
0	0.126^{c}	0.133^{c}	0.139^{c}	0.132^{B}
50	0.196^{b}	0.227^{a}	0.193^{b}	0.208^{A}
میانگین Mean	0161^{B}	0.170^{B}	0.183^{A}	

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هم‌فونت و هم‌قلم هستند، تفاوت معنی‌داری، با آزمون دانکن در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

Means followed by the same letters with the same style, are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level.



شکل ۱- تأثیر اسید هیومیک بر غلظت فسفر ریشه‌ی گیاه ذرت

میانگین‌های دارای حروف مشترک تفاوت معنی‌داری با آزمون دانکن، در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

Figure 1- Effect of humic acid on phosphorus concentration of corn root

Means with the same letters are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level./

جدول ۹- مقایسه‌ی میانگین‌های غلظت فسفر ریشه ذرت (درصد) تحت تأثیر برهم‌کنش فسفر و آهن

Table 9- Mean comparison of P concentration (%) in corn root as affected by interaction of phosphorus and Fe levels

فسفر Phosphorus (mg kg^{-1} of soil)	آهن Fe (mg kg^{-1} of soi) 0	 10	 20	میانگین Mean
0	0.074^{bc}	0.079^{b}	0.063^{c}	0.072^{B}
50	0.115^{a}	0.119^{a}	0.127^{a}	0.120^{A}
میانگین* Mean*	0.095	0.100	0.094	

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هم‌فونت و هم‌قلم هستند، تفاوت معنی‌داری، با آزمون دانکن در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

*: مقایسه‌ی میانگین، به دلیل معنی‌دار نبودن اثر اصلی عامل براساس نتایج تجزیه‌ی واریانس، انجام نشد.

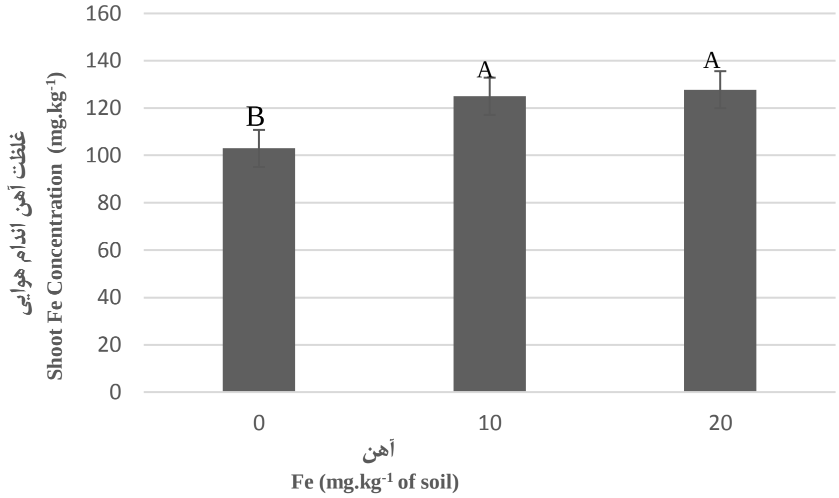
Means followed by the same letters with the same style, are not significantly different by Duncan's test at the 0.0 level.
*: Mean comparison was not done since the main effect of the factor was not significant according to the ANOVA results.

مقایسه‌ی میانگین غلظت فسفر ریشه در برهم‌کنش فسفر-آهن (جدول ۹)، نشان داد که با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک بدون مصرف فسفر، مقدار غلظت فسفر ریشه به‌طور معنی‌داری، نسبت به سطح ۱۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک، کاهش یافته است درحالی‌که با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک، غلظت فسفر در تمام سطوح آهن افزایش معنی‌دار نشان داد ولی بین سطوح مختلف آهن کاربردی، اختلاف معنی‌داری دیده نشد. نتایج حاکی از آن است که در شرایط فقر فسفر خاک، افزودن کودهای معدنی آهن به خاک می‌تواند موجب کاهش فراهمی و جذب فسفر شود. این رفتار آنتاگونیستی آهن و فسفر در خاک می‌تواند به دلیل تشکیل و رسوب فسفات‌های آهن باشد.

غلظت آهن

براساس نتایج تجزیه واریانس، غلظت آهن اندام هوایی تنها تحت تأثیر فاکتورهای فسفر و آهن، در سطح یک درصد، قرار گرفت ولی کاربرد اسید هیومیک در آب آبیاری اثر معنی‌داری بر غلظت آهن اندام هوایی نداشت (جدول ۲)؛ هم‌چنین برهم‌کنش‌های دوگانه و سه‌گانه‌ی سه فاکتور نیز بر این ویژگی از نظر آماری معنی‌دار نشد. با کاربرد فسفر، غلظت آهن اندام هوایی از ۱۱۲ به ۱۲۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش معنی‌دار یافت که ۱۲ درصد نسبت به تیمارهای بدون فسفر بیش‌تر بود؛ این افزایش می‌تواند نتیجه‌ی بهبود وضعیت تغذیه‌ی گیاه با توجه به فقر فسفر خاک باشد. این درحالی‌ست که در شرایط فراهمی فسفر خاک، انتظار می‌رود مصرف کودهای فسفاتی باعث کاهش فراهمی و جذب آهن شوند. مقایسه‌ی میانگین‌ها نشان داد که کاربرد ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک، موجب افزایش معنی‌دار غلظت آهن اندام هوایی، نسبت به سطح عدم کاربرد آهن، گردیده است اما میانگین‌های این دو سطح اختلاف معنی‌داری نداشتند (شکل ۲). برهم‌کنش منفی بین فسفر و عناصر غذایی ریزمغذی آهن و روی در پژوهش‌های زیادی گزارش شده‌است که می‌تواند به دلیل کاهش جذب این عناصر و کاهش انتقال آن‌ها درون گیاه باشد (Ronaghi *et al.*, 2002; Sarhadi-Sardoui *et al.*, 2003). در پژوهشی دیگر، بررسی تأثیر کاربرد فسفر و آهن بر غلظت آهن در اندام هوایی ذرت نشان داد که غلظت آهن اندام هوایی با کاربرد آهن افزایش و با کاربرد فسفر کاهش می‌یابد (Chakrol-Hosseini, 1999).

نتایج پژوهش حاضر که در شرایط کمبود فسفر خاک (فسفر قابل استفاده‌ی کم‌تر از چهار میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک؛ جدول ۱) انجام شده، نشان داد که رفع کمبود فسفر و بهبود تغذیه گیاه می‌تواند منجر به افزایش غلظت آهن گیاه گردد؛ تغییرات غلظت آهن ریشه با مصرف فسفر نیز روند مشابهی داشت. غلظت آهن ریشه در مقایسه با اندام هوایی علاوه بر اثرات معنی‌دار دو فاکتور فسفر و آهن، به‌طور معنی‌داری متأثر از فاکتور اسید هیومیک نیز شد. هم‌چنین اثرات متقابل سه فاکتور و بر هم‌کنش دوگانه‌ی فسفر و آهن معنی‌دار شدند (جدول ۳). با توجه به برهم‌کنش سه‌گانه‌ی معنی‌دار فاکتورها، مقایسه‌ی میانگین‌ها با آزمون دانکن (در سطح پنج درصد) انجام گردید (جدول ۱۰). در سطح ۱ فسفر (عدم کاربرد آن) برخلاف افزایش‌های مشاهده شده در غلظت آهن همزمان با افزایش سطوح اسید هیومیک و آهن، هیچ‌کدام از میانگین‌های نه‌گانه، اختلاف معنی‌داری از نظر آماری نداشتند ولی با مصرف کود فسفر (سطح ۲ فسفر)، در تمامی سطوح آهن، با افزایش مقدار مصرف اسید هیومیک، غلظت آهن ریشه افزایش یافت که تنها در سطح ۳ آهن، این افزایش‌ها معنی‌دار بود. بیش‌ترین غلظت آهن ریشه در تیمار بالاترین سطح هرکدام از فاکتورها، مشاهده گردید که حدود ۱۱۰ درصد بیش از شاهد بود. اثر افزایشی مصرف آهن نیز در سطح ۱ اسید هیومیک معنی‌دار نبود ولی با کاربرد فسفر (سطح ۲) و اسید هیومیک (سطح ۲ و سطح ۳) کاربرد ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک موجب افزایش معنی‌دار آهن ریشه نسبت به دو سطح دیگر شد (جدول ۱۰). افزایش غلظت آهن در گیاه در حضور اسید هیومیک ممکن است به دلیل تشکیل کمپلکس‌های آلی آهن در خاک و افزایش فراهمی زیستی آن باشد.



شکل ۲- تأثیر کاربرد آهن بر غلظت آهن اندام هوایی ذرت

میانگین‌های دارای حروف مشترک تفاوت معنی‌داری با آزمون دانکن، در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

Figure 2- Effect of Fe (iron) on Fe concentration of corn shoot

Means with the same letters are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level.

جدول ۱۰- مقایسه‌ی میانگین‌های غلظت آهن ریشه (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در سطوح مختلف فسفر، اسید هیومیک، آهن

Table 10- Mean comparison of corn roots Fe concentration (mg kg^{-1}), in different levels of phosphorus, humic acid, and Fe (iron)

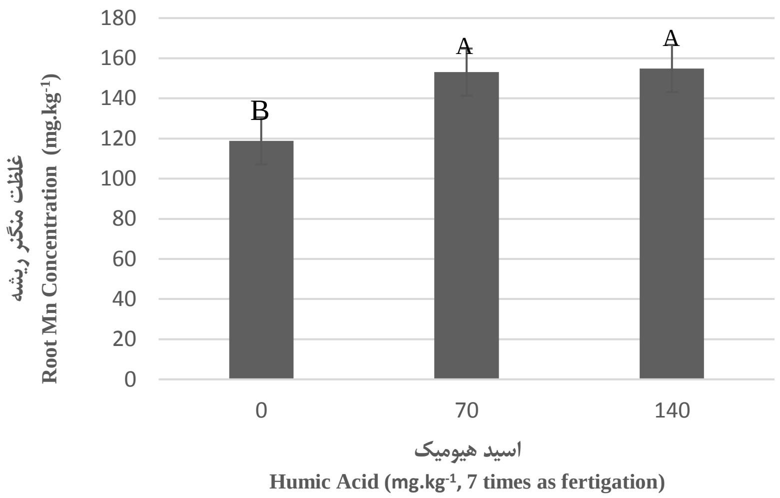
فسفر Phosphorus (mg kg^{-1} of soil)	آهن Fe (mg kg^{-1} of soil)	اسید هیومیک Humic Acid (mg kg^{-1}, 7 times as fertigation) 0	70	140	میانگین Mean
0	0	380.25^{d}	411.98^{d}	477.59^{cd}	423.3^{B}
	10	391.34^{d}	472.86^{cd}	480.15^{cd}	444.1^{B}
	20	384.49^{d}	488.16^{cd}	406.69^{d}	426.4^{B}
50	0	498.26^{cd}	481.31^{cd}	508.02^{cd}	495.9^{B}
	10	493.76^{cd}	499.54^{cd}	599.17^{bc}	530.8^{B}
	20	458.82^{cd}	734.97^{ab}	794.16^{a}	653.6^{A}
میانگین Mean		434.5^{B}	501.9^{A}	548.1^{A}	

میانگین‌های دارای حروف مشترک هم‌فونت و هم‌قلم، تفاوت معنی‌داری، با آزمون دانکن در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

Means followed by the same letters in the same style, are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level.

غلظت منگنز

براساس نتایج تجزیه‌ی واریانس، اثر فسفر بر غلظت منگنز اندام هوایی ذرت، در سطح یک درصد آماری، معنی‌دار بود؛ غلظت منگنز اندام هوایی با مصرف فسفر از ۸۸ به ۱۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم (۴۲ درصد) افزایش معنی‌دار نشان داد. اثر سایر فاکتورها و نیز برهم‌کنش بین آن‌ها بر منگنز اندام هوایی معنی‌دار نشد. با توجه به نتایج تجزیه‌ی واریانس، غلظت منگنز ریشه نیز تنها تأثیر معنی‌دار اسید هیومیک را در سطح پنج درصد، نشان داد و هیچ‌کدام از دیگر فاکتورها یا برهم‌کنش بین آن‌ها، بر غلظت منگنز ریشه معنی‌دار نبودند (جدول ۳). مقایسه‌ی میانگین‌های غلظت منگنز ریشه در سطوح مختلف اسید هیومیک (شکل ۳) نشان داد که با کاربرد ۷۰ و ۱۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اسید هیومیک در هفت نوبت با آب آبیاری، غلظت منگنز ریشه نسبت به سطح عدم کاربرد آن، افزایش معنی‌داری پیدا کرد، البته این دو سطح اختلاف معنی‌داری در غلظت منگنز ریشه نداشتند. تأثیر مثبت اسید هیومیک بر جذب و قابلیت دسترسی عناصر ریزمغذی از جمله منگنز در مطالعات بسیاری گزارش شده است. استفاده از اسید هیومیک باعث افزایش رشد رویشی گیاه می‌شود که یکی از دلایل آن افزایش جذب عناصر غذایی است (Harper *et al.*, 2000). اسید هیومیک با وزن مولکولی ۳۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰۰ دالتون، توانایی ایجاد کمپلکس‌های محلول با عناصر ریزمغذی را دارد (Michael, 2001).



شکل ۳- تأثیر اسید هیومیک بر غلظت منگنز ریشه‌ی گیاه ذرت

میانگین‌های دارای حروف مشترک، تفاوت معنی‌داری، با آزمون دانکن در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

Figure 3- Effect of humic acid on Mn concentration of corn root

Means with the same letters, are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level

غلظت روی

براساس نتایج تجزیه‌ی واریانس تأثیر هیچ‌کدام از فاکتورها به‌طور مستقل، بر غلظت روی اندام هوایی معنی‌دار نشد و تنها، برهم‌کنش فسفر و اسید هیومیک در سطح یک درصد آماری بر آن تأثیر معنی‌دار داشت (جدول ۲). براساس نتایج مقایسه میانگین، مقدار غلظت روی اندام هوایی در تیمارهای بدون کاربرد فسفر و ۱۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اسید هیومیک در هفت نوبت با آب آبیاری، به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از سایرین بود هیچ‌کدام از دیگر میانگین‌ها اختلاف معنی‌داری نشان ندادند (جدول ۱۱). غلظت بالای فسفر در خاک می‌تواند سبب کاهش روی در بافت گیاهی شود، همچنین اثرات متقابل منفی ناشی از روابط آنتاگونیسمی بین فسفر و روی در خاک، همواره مورد تأیید پژوهشگران بوده است (Sumner & Farina, 1986). به نظر می‌رسد که در غلظت بالای فسفر، انتقال دهنده‌های روی در گیاه غیرفعال شده و ساخت آنزیم‌هایی که روی در آن دخالت دارد، متوقف می‌شود (Sekhon, 1994)، درحالی‌که در این پژوهش با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک، کاهشی در غلظت روی اندام هوایی مشاهده نگردید؛ این نتیجه با توجه به فقر فسفر خاک و عدم مشاهده‌ی غلظت‌های بسیار بالای فسفر در بافت‌های گیاهی در این سطح، قابل توجیه است.

جدول ۱۱- مقایسه‌ی میانگین‌های غلظت روی اندام هوایی ذرت (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در سطوح مختلف فسفر و اسید هیومیک

Table 11- Mean comparison of Zn concentration (mg kg^{-1}) in corn shoot as affected by different phosphorus and humic acid levels

فسفر Phosphorus (mg kg^{-1} of soil)	اسید هیومیک Humic Acid (mg kg^{-1}, 7 times as fertigation)			میانگین* Mean*
	0	70	140	
0	32.49^b	33.06^b	35.52^a	33.7
50	33.54^b	32.07^b	32.45^b	32.7
میانگین* Mean*	33.0	32.6	33.9	

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، تفاوت معنی‌داری، با آزمون دانکن در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

*: مقایسه‌ی میانگین، به دلیل معنی‌دار نبودن اثر اصلی عامل براساس نتایج تجزیه‌ی واریانس، انجام نشد.

Means with the same letters, are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level.

*: Mean comparison was not done since the main effect of the factor was not significant according to the ANOVA results.

اثر فسفر بر غلظت روی ریشه معنی‌دار شد به‌طوری‌که میانگین غلظت روی ریشه با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک از ۴۵/۹ به ۴۷/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش داشت. برهم‌کنش اسید هیومیک و آهن نیز بر غلظت روی ریشه معنی‌دار شد. بررسی برهم‌کنش آهن و اسید هیومیک نشان داد که افزایش سطح آهن به ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بدون کاربرد اسید هیومیک، موجب کاهش معنی‌دار غلظت روی ریشه شد (جدول ۱۲)، از آن‌جایی که این کاهش غلظت در اندام هوایی رخ نداد می‌توان گفت اثر تنازعی آهن و روی در گیاه ذرت و انتقال آن به اندام هوایی، معنی‌دار نبوده و کاهش روی در ریشه، به رقابت این دو عنصر در جذب از خاک و رفتار آنتاگونیستی آن‌ها در تشکیل کمپلکس‌های محلول در خاک و جذب توسط گیاه، برمی‌گردد. با کاربرد اسید هیومیک (سطح ۲ و ۳)، اثر کاهشی آهن بر غلظت روی ریشه، معنی‌دار نگردید این بدان معناست که احتمالاً اسید هیومیک توانسته است با ایجاد کمپلکس‌های محلول، فراهمی هر دو عنصر را افزایش دهد. نظامی و ملکوتی (Nezami & Malakouti, 2016) نیز گزارش کردند که مصرف اسیدهای آلی با غلظت ۱۰ میلی‌مولار، در خاک‌های آهکی با افزایش جذب فسفر و روی، توانست نیاز گیاه را برطرف کند. اسیدهای آلی با کاهش pH ناحیه ریزوسفر و ایجاد کمپلکس با عنصر روی، در افزایش فراهمی این عنصر برای گیاه نقش دارند (Hoffland *et al.*, 2006).

غلظت مس

براساس نتایج تجزیه واریانس، غلظت مس در اندام هوایی ذرت تنها تحت تأثیر معنی‌دار فسفر و آهن قرار گرفت و اسید هیومیک بر آن اثر معنی‌داری نداشت هیچ برهم‌کنش معنی‌داری نیز بر این ویژگی مشاهده نشد (جدول ۲). غلظت مس ریشه نیز تنها تحت تأثیر معنی‌دار فسفر و اسید هیومیک قرار گرفت و اثر آهن و برهم‌کنش‌ها معنی‌دار نبودند (جدول ۳). غلظت مس اندام هوایی در سطح ۲ فسفر نسبت به سطح ۱، عدم کاربرد فسفر، ۱۵ درصد افزایش داشت این افزایش می‌تواند به‌دلیل بهبود تغذیه گیاه، رفع کمبود فسفر و توسعه‌ی مناسب ریشه در خاک که در این پژوهش نیز افزایش وزن خشک ریشه حاکی از آن بود، باشد. با افزایش مقدار کاربرد آهن، غلظت مس اندام هوایی ذرت کاهش یافت ولی این کاهش فقط در سطح ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک، آن هم فقط نسبت به شاهد (سطح ۱)، معنی‌دار بود (شکل ۴). برهم‌کنش منفی آهن و مس در دیگر پژوهش‌ها گزارش شده‌است. فاجریا (Fageriya, 2011) گزارش کرد که غلظت کلسیم، منیزیم و آهن در گیاه برنج، با کاربرد مس کاهش معنی‌داری داشت. همچنین اوزونیدو و همکاران (Ouzounidou *et al.*, 1995)، کاهش معنی‌دار غلظت آهن با کاربرد کود مس را گزارش کرده‌اند.

غلظت مس در ریشه، همانند اندام هوایی، با کاربرد فسفر افزایش معنی‌دار یافت که حدود ۱۲ درصد بود (شکل ۵). کاربرد اسید هیومیک نیز غلظت مس ریشه را افزایش معنی‌دار داد که این افزایش در سطح ۷۰ و ۱۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اسید هیومیک در هفت نوبت با آب آبیاری، به‌ترتیب ۱۸ و ۱۲ درصد بود، البته بین کاربرد ۷۰ و ۱۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، تفاوت معنی‌داری از این جهت مشاهده نشد (شکل ۵). در مورد غلظت مس بافت‌های گیاهی (اندام هوایی و ریشه)، هیچ برهم‌کنش معنی‌داری بین سه فاکتور مورد بررسی در این پژوهش، مشاهده نگردید.

جدول ۱۲- مقایسه‌ی میانگین‌های غلظت روی ریشه ذرت (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در سطوح مختلف آهن و اسید هیومیک

Table 12- Mean comparison of Zn concentration of corn root (mg kg^{-1}) in different levels of Fe and humic acid

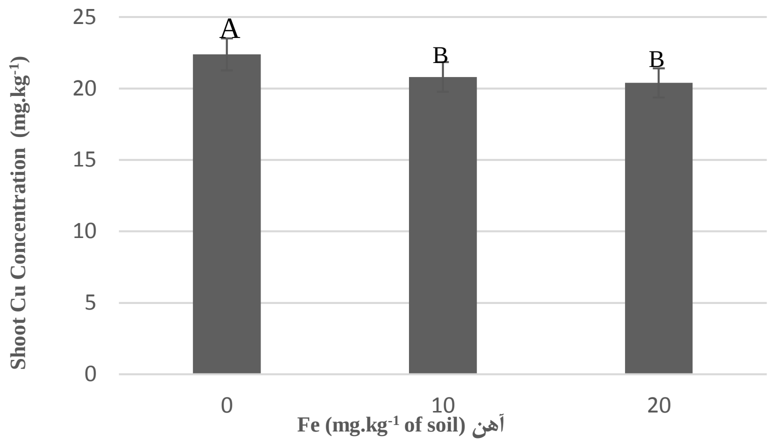
آهن Fe (mg kg^{-1} of soil)	اسید هیومیک Humic Acid (mg kg^{-1}, 7 times as fertigation)			میانگین* Mean*
	0	70	140	
0	47.1^{a}	45.9^{ab}	46.7^{a}	46.6
10	47.2^{a}	47.4^{a}	46.2^{a}	47.0
20	43.7^{b}	46.0^{ab}	48.4^{a}	46.0
میانگین* Mean*	46.0	46.4	47.2	

میانگین‌های دارای حروف مشترک، تفاوت معنی‌داری، با آزمون دانکن در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

*: مقایسه‌ی میانگین، به دلیل معنی‌دار نبودن اثر اصلی عامل براساس نتایج تجزیه‌ی واریانس، انجام نشد.

Means followed by the same letters, are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level.

*: Mean comparison was not done since the main effect of the factor was not significant according to the ANOVA results.

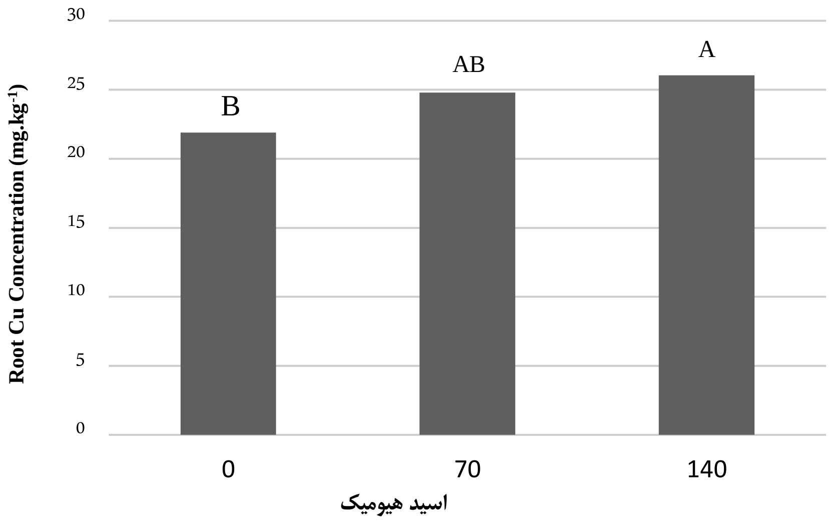


شکل ٤- تأثیر کاربرد آهن بر غلظت مس اندام هوایی ذرت

میانگین‌های دارای حروف مشترک تفاوت معنی‌داری با آزمون دانکن، در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

Figure 4- Effect of Fe on Cu concentration of corn shoot

Means with the same letters are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level



شکل ٥- تأثیر کاربرد اسید هیومیک بر غلظت مس ریشه ذرت

میانگین‌های دارای حروف مشترک تفاوت معنی داری با آزمون دانکن، در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

Figure 5- Effect of humic acid on Cu concentration of corn root

Means with the same letters are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی کاربرد اسید هیومیک بر رشد گیاه و ماده خشک تولیدی اثر مثبت داشت و با افزایش غلظت عناصر غذایی مورد مطالعه، اثرات مثبت و مطلوبی بر تغذیه‌ی معدنی گیاه ذرت نشان داد. نتایج این پژوهش نشان داد که برخلاف تأثیر مثبت اسید هیومیک بر افزایش جذب و بازده‌ی کود فسفاتی، در تیمارهایی که کود فسفاتی به کار نرفته و خاک از نظر فسفر فقیر بود (فسفر اولیه قابل استفاده‌ی خاک حدود چهار میلی‌گرم بر کیلوگرم)، اسید هیومیک نتوانست باعث افزایش جذب و فراهمی فسفر خاک شود. در حضور اسید هیومیک اثرات تنازعی بین آهن و روی کاهش یافت. با توجه به داده‌های وزن خشک اندام هوایی و کاهش آن با افزایش مصرف اسید هیومیک از ۷۰ به ۱۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در هفت نوبت با آب آبیاری و نیز عدم افزایش معنی‌دار غلظت اغلب عناصر غذایی مورد مطالعه در این سطح، غلظت ۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اسید هیومیک در هفت نوبت با آب آبیاری، مطلوب بوده است. بر اساس نتایج این پژوهش برهم‌کنش سه‌گانه‌ی اسید

هیومیک، منوکلسیم فسفات و سولفات آهن بر غلظت آهن اندام هوایی معنی‌دار نبود و در نتیجه تغییرپذیری اثرات تنازعی فسفر و آهن دیده نشد. به نظر می‌رسد برای بررسی این موضوع باید سطوح بیشتری از فسفر همراه با سطوح آهن، به‌کار برده شود.

References

1. Arjumend, T., Abbasi, M. K., & Rafique, E. (2015). Effects of lignite-derived humic acid on some selected soil properties, growth and nutrient uptake of wheat (*tritcum aestium* L.) grown under greenhouse conditions. *Pakistan Journal of Botany, 47*(6), 2231-2238.
2. Aylaj, M., Sisouane, M., Tahiri, S., Mouchrif, Y., & El Krati, M. (2023). Effects of humic acid extracted from organic waste composts on Turnip culture (*Brassica rapa* subsp. *rapa*) in a sandy soil. *Journal of Ecological Engineering*, *24*(7), 345-359. https://doi.org/10.12911/22998993/163510
3. Cavani, L., Ciavatta, C., & Gessa, C. (2003). Identification of organic matter from peat, leonardite and lignite fertilizers using humification parameters and electrofocusing. *Bioresource Technology*, *86*, 45-52. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00107-4
4. Chaji, N., Khorassani, R., Astaraei, A., & Lakzian, A. (2013). Effect of phosphorous and nitrogen on vegetative growth and production of daughter corms of saffron. *Journal of Saffron Research*, *1*(1), 1-12. https://doi.org/10.22077/jsr.2013.352
5. Chakerol-hosseini, M. (1999). *Effect of phosphorus and iron on growth and chemical composition of corn and soybean*. M.Sc. Thesis, College of Agriculture, Shiraz University, Iran. (In Persian with English abstract)
6. Ertani, A., Pizzeghello, D., Francioso, O., Muscolo, A., & Nardi, S. (2013). Isopentenyladenosine and cytokininlike activity of different humic substances. *Journal of Geochemical Exploration*, *129*, 70-75. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.10.007
7. Fageria N.K., Baligar, V.C., & Jones, C.A. (2011). *Growth and mineral nutrition of field crops (3rd Ed.)*. CRC Press, Taylor & Francis Group, New York.
8. FAO, IFAD, & WFP. (2015). *The state of food Insecurity in the world 2015*. Meeting the 2015 international hunger targets: taking stock of uneven progress. Rome, FAO. https://doi.org/10.3945/an.115.009936
9. Fixen, P.E., Ludwick, A.E., & Olsen, S.R. (1983). Phosphorus and potassium fertilization of irrigated alfalfa on calcareous soils: II. Soil phosphorus solubility relationships. *Soil Science Society of Amerrican Journal*, *47*, 112–117. https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700010023x
10. Gerke, J. (2021). The effect of humic substances on phosphate and iron acquisition by higher plants: Qualitative and quantitative aspects. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *184*(3), 329-338. https://doi.org/10.1002/jpln.202000525
11. Ghorbani, S.H., Khazaee, R., Kaafi, M., & Banayan, A. (2010). Effect of humic acid application in irrigation water on yield and yield components of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Agricultural Ecology*, *2*, 123-131. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jag.v2i1.7608
12. Harper, S.M., Kerven, G.L., Edwards, D.G., & Ostatek-Boczynski, Z. (2000). Characterisation of fulvic and humic acids from leaves of *Eucalyptus camaldulensis* and from decomposed hay. *Soil Biology and Biochemistry*, *32*(10), 1331-1336. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00021-3
13. Hoffland, E., Wei, C., & Wissuwa, M. (2006). Organic anion exudation by lowland rice (*Oryza sativa* L.) at zinc and phosphorus deficiency. *Plant and Soil*, *283*, 155–162. https://doi.org/10.1007/s11104-005-3937-1
14. Holford, I.C.R. (1997). Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Soil Australian Journal of Soil Research, 35*(2), 227–240. https://doi.org/10.1071/S96047
15. Hosseini, S., & Abedi, S. (2007). Assess the role of markets and government policies in determining the price of corn. *Agricultural Economics*, *1*, 21-34. (In Persian)
16. Hua, Q.X., Li, J.Y., Zhou, J.M., Wang, H.Y., Du, C.W., & Chen, X.Q. (2008). Enhancement of phosphorus solubility by humic substances in Ferrosols. *Pedosphere*, *18*, 533–538. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(08)60044-2
17. Jindo, K., Martim, S.A., Navarro, E.C., Pérez-Alfocea, F., Hernandez, T., Garcia, C., Aguiar, N.O., & Canellas, L.P. (2012). Root growth promotion by humic acids from composted and non-composted urban organic wastes. *Plant and Soil*, *353*, 209-220. https://doi.org/10.1007/s11104-011-1024-3
18. Jing, J., Zhang, S., Yuan, L., Li, Y., Lin, Z., Xiong, Q., & Zhao, B. (2020). Combining humic acid with phosphate fertilizer affects humic acid structure and its stimulating efficacy on the growth and nutrient uptake of maize seedlings. *Scientific Reports*, *10*(1), 17502. https://doi.org/10.1038/s41598-020-74349-6
19. Keating, B.A., & Carberry, P.S. (2010). Sustainable production, food security and supply chain implications. *Aspects of Applied Biology*, *102*, 7–20.
20. Keating, B.A., Herrero, M., Carberry, P.S., Gardner, J., & Cole, M.B. (2014). Food wedges: Framing the global food demand and supply challenge towards 2050. *Global Food Security*, *3*(3-4), 125–132. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2014.08.004
21. Li, Q., Wu, L., Chen, J., Khan, M. A., Luo, X., & Lin, W. (2016). Biochemical and microbial properties of

rhizospheres under maize/peanut intercropping. *Journal of Integrative Agriculture*, *15*(1), 101-110. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61089-9

22. Li, X., Geng, H., Zhang, L., Peng, S., Xin, Q., Huang, J., & Wang, Y. (2022). Improving maize yield prediction at the county level from 2002 to 2015 in China using a novel deep learning approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, *202*, 107356. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107356
23. Lindsay, W.L. (1979). *Chemical Equilibria in Soils.* Wiley-Interscience, New York.
24. Masood, T., Gul, R., Munsif, F., Jalal, F., Hussain, Z., Noreen, N., & Khan, H. (2021). Effect of different phosphorus levels on the yield and yield components of maize. *Sarhad Journal of Agriculture*, *27*(2), 167-170.
25. https://www.researchgate.net/publication/268011160
26. Michaeal, H.B., & Lua, H. (2001). Influence of humic acid on the growth of tomato in hydroponic systems. *Acta Horticulturae*, *548*, 451-458. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.548.53
27. Nezami, S., & Malakouti, M.J. (2016). The role of organic acids on the release of phosphorus and zinc in a calcareous soil. *Journal of Water and Soil*, *30*(3), 805-816. https://doi.org/10.22067/jsw.v30i3.40469
28. Oktem, A.G., & Oktem, A. (2020). Effect of Humic acid application methods on yield and some yield characteristics of corn plant (*Zea mays* L. indentata). *Journal of Applied Life Sciences International*, *23*(11), 31-37. https://doi.org/10.9734/jalsi/2020/v23i1130196
29. Ouzounidou, G., Čiamporová, M., Moustakas, M., & Karataglis, S. (1995). Responses of maize (*Zea mays* L.) plants to copper stress—I. Growth, mineral content and ultrastructure of roots. *Environmental and Experimental Botany*, *35*(2), 167-176. https://doi.org/10.1016/0098-8472(94)00049-B
30. Ronaghi, A., Chakrol-hosseini, M., & Karimian, N. (2002). Growth and chemical composition of corn as affected by phosphorus and iron. *Journal of Science and Technology of Agricultural and Natural Resources*, *6*, 91-102. (In Persian). https://doi.org/20.1001.1.22518517.1381.6.2.8.2
31. Sarhadi-Sardoui, J., Ronagashi, A., Maftoun, M., & Karimian, N. (2003). Growth and chemical composition of corn in three calcareous sandy soil of Iran as affected by applied phosphorus and manure. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *5*, 77-84. https://doi.org/20.1001.1.16807073.2003.5.1.4.1
32. Sekhon, G.S. (1994). Management of nutrient interactions in agriculture. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, *42*(1), 167-167.
33. Subhash, C., Malik A., Zargar, M.Y., & Bhat, M.A. (2011). Nitrate pollution: a menace to human, soil, water and plant. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, *1*, 22-32.
34. Sumner, M.E., & Farina, M.P. (1986). *Phosphorus Interactions with Other Nutrients and Lime in Field Cropping Systems*. In: Stewart, B. A., Ed., Advances in Soil Science, Springer, New York, 201-236. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8660-5_5
35. Yuan, Y., Gai, S., Tang, C., Jin, Y., Cheng, K., Antonietti, M., & Yang, F. (2022). Artificial humic acid improves maize growth and soil phosphorus utilization efficiency. *Applied Soil Ecology*, *179*, 104587. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104587